Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 1, 2023.(53-70)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Prediction and Optimization of Hardness Value of Mold Steel in Wirecut Process based on Fuzzy Inference System

Research Article

Farshad Rabiei[1], Masoud Seidi[2], Zahra Seydi[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.79508.1145

1. Introduction

Cutting dies are of the most widely used types of press dies and at the same time they are the most accurate types of dies that are used to create holes, edges, grooves, etc. on the work piece.

The clearance between above and below dies in the cutting molds is considered to be about 0.1 of the thickness of the sheet to make a proper cut on the sheet. Therefore, the dies must be made very precisely. On the other hand, the dies always involved with the sheet and it needs to have high hardness so that it does not wear out.

Another important issue is the phenomenon of fatigue, because cutting dies produce a piece in every cycle of a few seconds and are continuously subjected to cyclic loading. One of the parameters that can increase the fatigue life of these molds is increasing the hardness value. Therefore, the hardness of these molds increases with several methods.

In 1940, Russian scientist Lazarenko developed the hypothesis of electric discharge process with wire or wirecut. Wirecut is an electrothermal process that is used to make cutting dies. This process has very high dimensional accuracy due to the lack of contact between the tool and the work piece. On the other hand, due to the local increase and decrease of heat, it causes melting and increasing the hardness of the mold steels.

This study investigated an industrial need of the country, which is the production of quality cutting dies. By using the fuzzy inference system, mold hardness changes are predicted according to three parameters of wire speed, wire tension, and generator power. Then, with the done clustering, the optimal amount of hardness is determined based on the range of variables, and in the final phase, these predicted results are tested to extract the highest amount of hardness for the mold.

2. Experimental setup

One of the steels used to make cutting molds is Mo40 steel, which is an alloy of chromium and nickel. In this steel, hardness is possible due to the presence of chromium and strength is possible due to the presence of nickel. This steel is of medium carbon type.

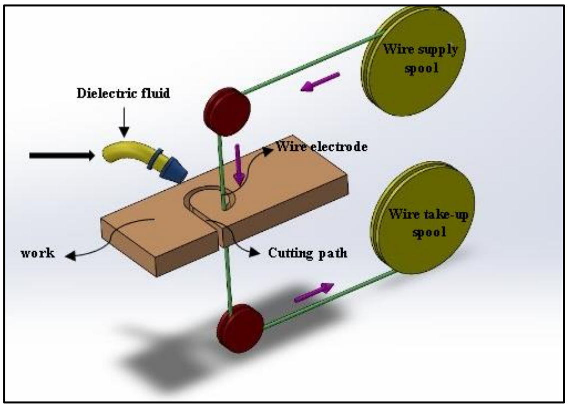


Figure 1. Wirecut schematic

The type of heat treatment that is performed on these steels is austenitizing, then quenching, and then tempering, which is used to harden this steel. This group of steels, due to the fact that they are used as quench tempers, have high strength and hardness, and at the same time, high toughness, and therefore, have a high strength-to-weight ratio. The alloy elements in this steel are carbon, chromium, manganese, molybdenum, and silicon.

In this research, Mo40 steel, which is one of the main steels used in making cutting dies, was used. At first, the Mo40 steel was completely planed using a lathe machine for uniformity in thickness, and it was brought to the final dimensions of 320 x 40 mm and 10 mm thickness. Then it was fixed on the CHARMILLES five-axis wirecut machine (Figure 2).

*Manuscript received, November 8, 2022. Revised, November 30, 2022, Accepted, December 14, 2022.

[1.] Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.
Email: F.rabiei@ilam.ac.ir.

[2] Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.

[3] Masters Degree, Faculty of Energy, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.



Figure 2. Five-axis wirecut machine and fixing the workpiece on it

Three parameters “wire injection speed”, “wire tension”, and “generator power” were selected as input parameters. Table 1 shows he range of these parameters.

Table 1. Test conditions

Wire diameter (mm)	0/2
Wire material	copper
Dielectric fluid	Distilled water
Wire injection speed (cm/s)	10-2
Wire tension (kg)	2/5-0/5
Generator power (percentage)	50-10
Initial hardness of the workpiece (Rockwell B)	45

Using the response procedure method, 20 experiments were conducted. For each test, a cylinder with a base diameter of 10 mm and a height of 10 mm was cut from the workpiece. Then, for the produced cylindrical parts, in four points, the hardness value with the machine Leeb Hardness Tester TA-1515 was measured with an accuracy of 0.1. After removing outlier data, the average data was recorded.

3. Prediction and optimization

In this research, it is considered to create a fuzzy inference system to predict and optimize the degree of hardness based on three parameters of speed, traction and power. The creation and use of this system is done in three phases: clustering, extracting if-then rules, and predicting and optimizing difficulty in the inference system built in MATLAB software.

4. Validation test

Based on the prediction charts, in order to validate the model, for the values of stretch 1.67, power 10 and speed 6, an experimental test was performed and the hardness value was obtained as 74.6, which has a very good match (2% error) with the model result (75.9) and it is the highest difficulty value among experimental tests.

5. Conclusion

In this research, the fuzzy inference system was used to predict and optimize the hardness value according to the variables of wire tension, wire feeding speed and generator power in the Mo40 steel wirecut process.

The results clearly show that this system has the ability to be implemented to predict and optimize the hardness in the wirecut process. In order to increase the accuracy of the model, the number of rules was increased from four to nineteen. Based on the extracted diagrams, the maximum hardness value was obtained for the values of 1.67 stretch, 10 power and 6 speed. These values were experimentally tested and a hardness value of 74.6 was obtained, which has a very good agreement with the model result (75.9) (about 2% error) and also shows the highest hardness value among the experimental tests.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۵، ۲، ۱۴۰۲. (۷۰-۵۳)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

پیش‌بینی و بهینه‌سازی مقدار سختی فولاد قالب در فرایند وایرکات مبتنی بر سیستم استنتاج فازی*

مقاله پژوهشی

فرشاد ربیعی(۱) مسعود صیدی(۲) زهرا صیدی(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2022.79293.1142

چکیده *قالبهای پرس‌کاری به دلیل سرعت بالای تولید در صنعت کاربرد زیادی دارند. به دلیل لقی بسیار کم بین سنبه و ماتریس و دارا بودن اشکال پیچیده، ساخت این قالبها بسیار گران و هزینه‌بَر است. از سوی دیگر، به واسطه تماس مکرر سنبه و ماتریس با ورق و نیز سرعتِ بالای فرایند، می‌بایست سختی قالب و متعاقباً عمر خستگی آنها بالا باشد. یکی از فرایندهایی که هم توان ایجاد سطوح با دقت ابعادی بالا و اشکال پیچیده را داراست و هم به واسطه ماهیت فرایند می‌تواند منجر به افزایش سختی قالب شود فرایند وایرکات است. در این تحقیق، به منظور بهبود عملکرد و افزایش عمر قالب‌های برش، سختی فولاد Mo40 بهینه‌سازی می‌شود. برای این منظور ابتدا بر اساس روش رویه پاسخ، طراحی آزمایش برای سه پارامتر سرعت تزریق سیم، کشش سیم و توان ژنراتور طراحی شده است. در ادامه داده‌های به دست آمده خوشه‌بندی شده و سپس قواعد فازی با سه ورودی (سرعت، کشش و توان) و خروجی (سختی) استخراج شده‌اند. قواعد به دست آمده در جعبه ابزار سیستم‌های استنتاج فازی نرم‌افزار متلب وارد شدند. بر اساس سیستم استنتاج فازی تعریف شده، امکان پیش‌بینی سختی بر اساس پارامترهای سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور فراهم شده است. در فاز بعدی، بر اساس این سیستم و در محدوده متغیرهای موجود، مقدار بهینه سختی و متغیرهای متناظر استخراج گردید. در نهایت این مقادیر به صورت تجربی تست گردید و تطابق آن با مقدار به دست آمده مشاهده گردید.*

واژه‌های کلیدی وایرکات، سرعت تزریق سیم، کشش سیم، توان ژنراتور، سیستم استنتاج فازی، پیش‌بینی و مدل‌سازی، بهینه‌سازی.

Prediction and Optimization of Mold Steel Hardness in Wire Cut Process Based on Fuzzy Inference System

Farshad Rabiei Masoud Seidi Zahra Seidy

Abstract Pressing molds are widely used in the industry due to the high speed of parts production. Due to the very low clearance between the mandrel and the matrix and having complex shapes, the production of these molds is very expensive and costly. The hardness of the mold and subsequently their fatigue life should be high. One of the processes that has the ability to create surfaces with high dimensional accuracy and complex shapes is the wirecut process. In this research, in order to improve the performance and increase the life of cutting dies, the hardness of Mo40 steel is optimized. For this purpose, based on the method of the response procedure, the design of the experiment has been designed for the three parameters of wire feed speed, wire tension and generator power. Next, the obtained data are clustered and then fuzzy rules with three inputs (wire speed, tension and power) and output (hardness) are extracted. The obtained rules were entered in the toolbox of fuzzy inference systems of MATLAB software. Based on the defined fuzzy inference system, it is possible to predict the hardness based on the parameters of wire speed, wire tension and generator power. In the next phase, based on this system and within the range of available variables, the optimal value of hardness and corresponding variables were extracted. In the final phase, these values were experimentally tested and their agreement with the obtained value was observed.

Keywords: Wire Cut, Wire Feed Speed, Wire Tension, Generator Power, Fuzzy Inference System, Prediction and Modeling, Optimization.

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام.

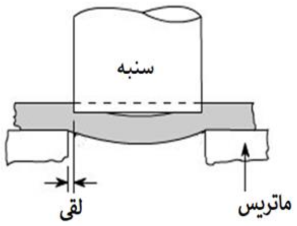
Email: F.rabiei@ilam.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

(۳) کارشناس ارشد، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

مقدمه

قالبهای برش یکی از انواع پرکاربرد قالبهای پرس و در عین‌حال دقیقترین نوع قالبها هستند که برای ایجاد حفره‌ها، سوراخ‌ها، لبه‌ها، شیارها و... روی قطعه کار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قالبها از دو جزء اصلی به نام سنبه و ماتریس تشکیل شده-اند شکل (۱).

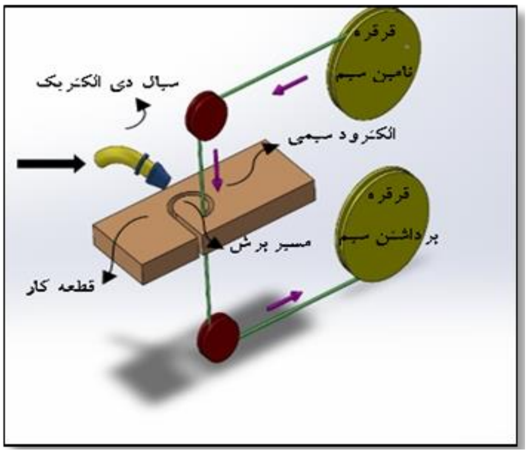


شکل ۱ قالب برش

لقی بین سنبه و ماتریس در قالب‌های برش برای ایجاد برش مناسب بر روی ورق، حدود ۰٫۱ ضخامت ورق در نظر گرفته می‌شود. از این رو سنبه و ماتریس باید بسیار دقیق ساخته شوند. از سوی دیگر سنبه همواره با ورق درگیر است و نیاز است که دارای سختی بالایی باشد تا دچار ساییدگی نشود.

یکی دیگر از مسائل حائز اهمیت پدیده خستگی است چرا که قالب‌های برش در هر سیکل چند ثانیه‌ای یک قطعه تولید می‌کنند و به‌طور مداوم تحت بارگذاری سیکلی قرار دارند. یکی از پارامترهایی که می‌تواند عمر خستگی این قالب‌ها را افزایش دهد افزایش مقدار سختی است. از این رو با روشهای متعددی سختی این قالب‌ها افزایش می‌یابد.

سال ۱۹۴۰ لازارنکو دانشمند روسی فرضیه فرایند تخلیه الکتریکی با سیم یا وایرکات را توسعه داد [1]. وایرکات یک فرایند الکتروترمال است که برای ساخت قالب‌های برش مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. این فرایند از یک‌سو به واسطه عدم تماس ابزار با قطعه‌کار دارای دقت ابعادی بسیار بالایی است و از سوی دیگر به واسطه افزایش و کاهش موضعی حرارت سبب آبدیده شدن و افزایش سختی فولادهای قالب می‌شود. از این‌رو تحقیقات متعددی بر روی این فرایند انجام شده است. شماتیک فرایند وایرکات در شکل (۲) نشان داده شده است. وایرکات یک فرایند پیشرفته ماشین‌کاری است که امکان براده‌برداری فرسایشی از قطعات رسانا با اشکال پیچیده در صنایع هوافضا، پزشکی، خودروسازی و ساخت قالب را فراهم می‌سازد.



شکل ۲ شماتیک وایرکات

وایرکات مانند سایر فرایندهای ماشین‌کاری، ماده را از سطح قطعه‌کار جدا می‌کند این کار توسط حرکت یک الکترود سیمی در قطعه‌کار اتفاق می‌افتد. پالس‌های DC الکتریکی متوالی بین الکترود سیمی و قطعه‌کار ایجاد می‌شود و بین این دو، مایع دی‌الکتریک قرار می‌گیرد. زمانی که ولتاژ کافی اعمال می‌شود سیال یونیزه شده، سپس یک جرقه کنترل شده با قطعه-کار برخورد می‌کند و باعث ذوب و بخار شدن آن می‌شود. سیال پرفشار دی‌الکتریک، قطعه‌کار را خنک کرده و باعث جدا شدن مواد دوباره منجمدشده از فاصله هوایی بین الکترود و قطعه‌کار می‌شود. این فاصله هوایی از برخورد الکترود با قطعه-کار جلوگیری کرده و سیم در طی فرایند برش هیچ‌گاه با قطعه-کار تماس ندارد. به همین دلیل وایرکات یک فرایند برش بدون ایجاد هر گونه تنش مکانیکی در قطعه‌کار می‌باشد و این یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این روش می‌باشد [3-8].

دقت ابعادی قالب مستقیماً دقت ابعادی قطعات ماشین‌کاری شده را تعیین می‌کند، زبری سطح بر روی خستگی، مقاومت در برابر خوردگی، سرعت سایش و خواص تریبولوژیکی قالب‌ها تأثیر می‌گذارد [9-12]. همچنین سختی بالا نشان دهنده عملکرد بهتر در فرایند وایرکات است [13].

تحقیقات متعددی جهت افزایش سختی و نیز افزایش و بهینه‌سازی سختی قالب انجام شده است. نیستانک و همکاران تأثیر پارامترهای مختلف وایرکات بر روی میکروسختی فولاد ساده کربنی St 37 را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها گزارش دادند که با تغییر ولتاژ مدار باز، زمان خاموشی پالس و فشار

دی‌الکتریک می‌توان باعث تغییر در میزان نفوذ مس (جنس سیم مورد استفاده در وایرکات) در قطعه‌کار شد و به این ترتیب میزان سختی سطحی آن را تغییر داد [14]. سلیمانی‌مهر و همکاران اثر شدت جریان بر سختی و زبری سطح قطعه فولادی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش ۱۰ برابری شدت جریان میزان سختی سطحی ۰٫۸ برابر شده و زبری سطح دو برابر می‌شود [15].

کیاک و همکاران تأثیر زمان خاموشی پالس، زمان روشنی پالس و ضخامت قالب را بر روی میزان سختی فولاد بررسی کردند. آنها تأثیر مستقیم این پارامترها بر روی سختی سطح را گزارش دادند [16].

بوپاتی و همکاران با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی میزان سختی فولاد زنگ نزن کربونیتریده شده را بررسی کردند و شرایط بهینه‌ای را برای محدوده پارامترهای آزمایشگاهی خود تعیین کردند [17].

پاتوری و همکاران تأثیر فاکتورهای کنترلی مانند زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس، پیک جریان، ولتاژ و نرخ تغذیه سیم برای فولاد Inconel 718 را بررسی کردند. در این پژوهش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، SVM و الگوریتم ژنتیک (GA) برای مدلسازی و بهینه‌سازی سختی استفاده شد. نتایج نشان داد جریان پیک ٦٠٫٢١٪ بر زبری سطح تأثیرگذار است [18].

موراليدهارا و همکاران نیز تأثیر پارامترهای زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس را بر روی فولاد بررسی کردند. آنها با بررسی مشخصه‌های لایه سفید ایجاد شده به توصیف میزان سختی بر روی سطح پرداختند [19]. داس و همکاران از روش تاپسیس برای بهینه‌سازی پارامترهای مختلف بر روی میزان سختی فولاد استفاده کردند و شرایط بهینه‌ای را برای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و... به دست آوردند [20].

مانجوناتا و همکاران اثر پارامترهای ولتاژ سروو، سرعت ماشین‌کاری، زمان روشنی و خاموشی پالس را بر زبری سطح و سختی بررسی کردند. در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی فرایند وایرکات استفاده شد. نتایج نشان داد، با افزایش ولتاژ سروو دقت ابعادی افزایش می‌یابد [21].

یکی دیگر از تکنیک‌هایی که جهت پیش‌بینی خروجی بر اساس پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار گرفته است سیستم استنتاج فازی است. این سیستم در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج قابل قبولی استخراج شده است که می‌توان از این قابلیت در پیش‌بینی و بهینه‌سازی سختی در فرایند وایرکات بهره برد. بواد و همکاران با استفاده از نرم‌افزار متلب به طراحی یک سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری سیمان تقویت شده با مواد مختلف پرداختند. نتایج نشان داد سیستم مدلسازی استنتاج فازی نتایج معقولی را در مقایسه با مطالعات قبلی ارائه می‌دهد [22]. ویچوونه و همکاران به منظور تغییر مسیر خودکار هنگام نزدیک شدن به یک مانع در ماشینهای اتومات، یک مدل تغییر مسیر بر اساس سیستم استنتاج فازی طراحی کردند. در این پژوهش یک ارزیابی مقایسه‌ای بین دو مدل بر اساس سیستم استنتاج فازی تطبیقی و استنتاج عصبی- فازی انجام شد. این مدل‌ها با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایش تغییر مسیر اجباری ارزیابی شدند. بر اساس نتایج مدل استنتاج فازی- عصبی تغییر مسیر صحیحتری را ارائه می‌دهد [23]. وو و همکاران به منظور پیش-بینی الگوهای جریان سیال و ایجاد یک مدل پیش‌بینی سازگار، یک سیستم استنتاج فازی با مدل فازی ممدانی طراحی کردند. نتایج نشان داد سیستم استنتاج فازی در مقایسه با الگوریتم شبکه عصبی از دقت و پایایی بالاتری برخوردار است. هزینه-های تولید تا حد زیادی کاهش و عملکرد ایمن تجهیزات افزایش یافت [24]. بو و همکاران برای کنترل بهینه خودروهای الکتریکی هیبریدی، به منظور عملکرد دینامیکی و مصرف سوخت بهتر، یک سیستم استنتاج فازی شبکه تطبیقی طراحی کردند. قوانین و پارامترهای فازی را به صورت آنلاین از طریق الگوریتم یادگیری Q مشخص کردند. روش کنترل QLFIS را با روش برنامه‌ریزی پویا (DP) از طریق شبیه‌سازی مقایسه کردند. همچنین گزارش دادند نتایج شبیه‌سازی عملکرد دینامیکی خودرو و مصرف سوخت با توجه به روش کنترل QLFIS بهبود یافته است، در حالی که زمان محاسبه در مقایسه با روش DP بسیار کاهش یافته است [25]. ولی‌زاده و همکاران با استفاده از سیستم استنتاج فازی و استنتاج فازی- عصبی به تعیین همزمان سالمترول و فلوتیکازون در مخلوطهای دارویی پرداختند. آنها با گزارش آزمون آنالیز واریانس نشان دادند با استفاده از سیستم استنتاج فازی، دقت روش اسپکتروفتومتری با روش کروماتو گرافی مایع با کارایی بالا برابری می‌کند؛ بنابراین

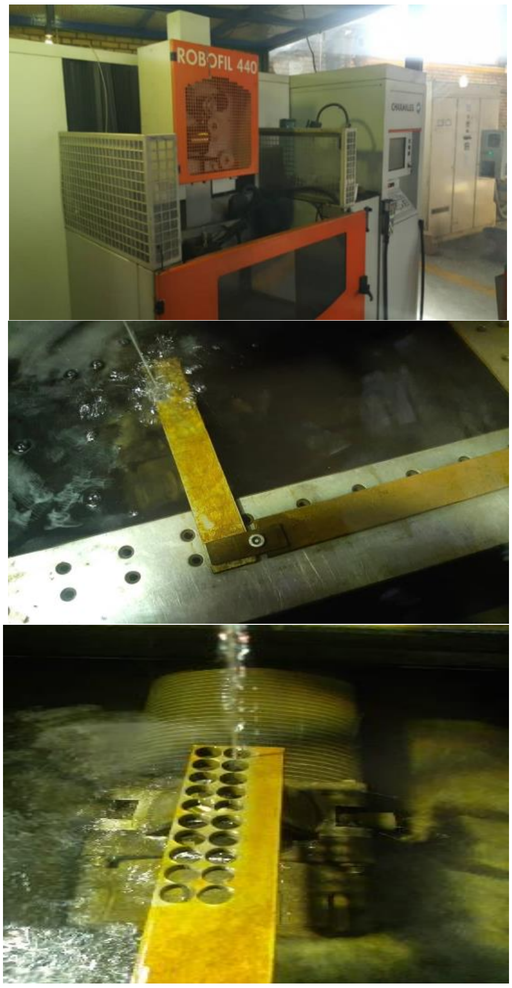
این روش می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای آنالیز همزمان داروها در مقایسه با روش پرهزینه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا باشد [26].

در تحقیق حاضر یک نیاز صنعتی کشور که ساخت قالب های برش با کیفیت است مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، با استفاده از سیستم استنتاج فازی، تغییرات سختی قالب برحسب سه پارامتر سرعت سیم، کشش سیم و توان ژنراتور پیش‌بینی می‌شود. سپس با خوشه‌بندی‌های انجام‌شده مقدار بهینه سختی بر اساس محدوده متغیرها تعیین می‌شود و در فاز نهایی این نتایج پیش‌بینی شده مورد تست قرار می‌گیرد تا بالاترین میزان سختی برای قالب استخراج گردد.

شرایط آزمایشگاهی

یکی از فولادهایی که برای ساخت قالب‌های برش مورد استفاده قرار می‌گیرد فولاد Mo40 است که آلیاژی از کروم و نیکل است. در این فولاد به واسطه حضور کروم امکان سختی و به واسطه حضور نیکل امکان استحکام برای فولاد فراهم شده است. این فولاد از نوع کربن متوسط است. نوع عملیات حرارتی که روی این فولادها انجام می‌شود، عملیات آستنیته کردن و بعد کوئنچ و سپس تمپر کردن است که جهت سخت کردن این فولاد به کار می‌رود. این گروه فولادها با توجه به اینکه به صورت کوئنچ تمپر به کار می‌روند، دارای استحکام بالا و سختی و در عین حال چقرمگی بالایی هستند و بنابراین، دارای نسبت استحکام به وزن بالایی می‌باشند. عناصر آلیاژی در این فولاد عبارتند از: کربن، کرم، منگنز، مولبیدن و سیلیسم. در این پژوهش از فولاد Mo40 که یکی از اصلی‌ترین فولادهای مورد استفاده در ساخت قالب‌های برش است استفاده شده است. در ابتدا فولاد Mo40 جهت یکنواختی در ضخامت با استفاده از دستگاه صفحه تراش کاملاً کف‌تراشی شد و به ابعاد نهایی ۳۲۰ در ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر رسانده شد. سپس بر روی دستگاه وایرکات پنج محور CHARMILLES (شکل ۳) تثبیت شد.

سه پارامتر سرعت تزریق سیم، کشش سیم و توان ژنراتور به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شد. محدوده این پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۳ دستگاه وایرکات پنج محوره و تثبیت قطعه‌کار بر روی آن

جدول ۱ شرایط انجام آزمایش

قطر سیم (میلی‌متر)	۰٫۲
جنس سیم	مس
سیال دی الکتریک	آب مقطر
سرعت تزریق سیم (سانتی‌متر بر ثانیه)	۱۰-۲
کشش سیم (کیلوگرم)	۰٫۵-۲٫۵
توان ژنراتور (درصد)	۱۰-۵۰
سختی اولیه قطعه‌کار (راکول بی)	۴۵

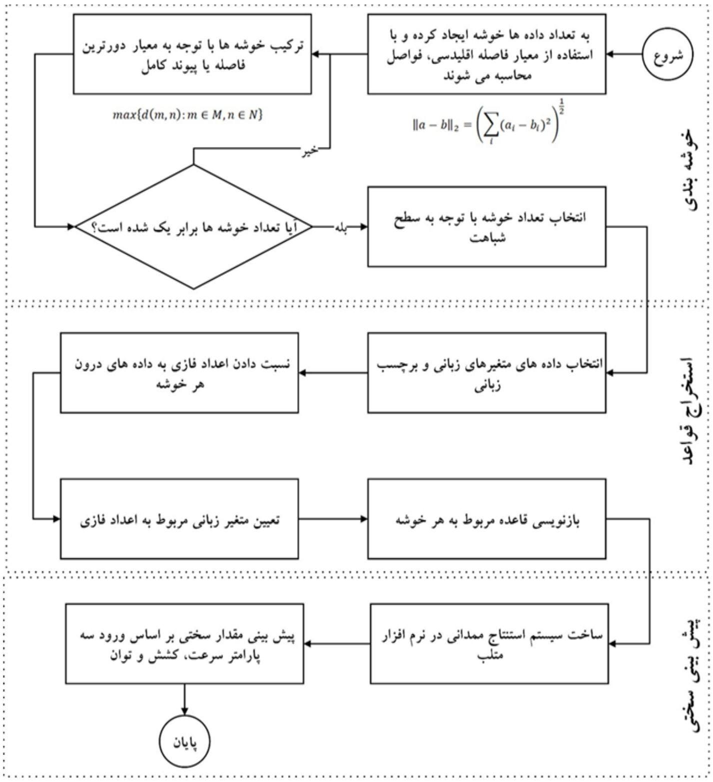
با استفاده از روش رویه پاسخ، ۲۰ آزمایش مطابق با جدول (۲) انجام شد. برای هر تست، یک استوانه به قطر قاعده ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر از قطعه‌کار برش‌کاری شد. سپس برای قطعات استوانه‌ای تولید شده، در چهار نقطه مقدار سختی با دستگاه Leeb Hardness Tester TA-1515 با دقت ۰٫۱ اندازه‌گیری شد (شکل ٤) و پس از حذف داده‌های پرت، میانگین داده‌ها در جدول (۲) ثبت شد.

جدول ۲ آزمایش‌های انجام شده

ردیف	کشش (کیلوگرم)	سرعت (سانتی‌متر بر ثانیه)	توان ژنراتور (درصد)	سختی (راکول بی)
۱	۰,۵	۲	۵۰	٦۸
۲	۰,۵	۲	۱۰	٦۷,۵
۳	۲,۵	٦	۳۰	٦۸,۲
٤	۰,۵	۱۰	۱۰	٦۸,٦
۵	۰,۵	٦	۳۰	٦۵
٦	۱,۵	٦	۳۰	٦۸,۷
۷	۱,۵	٦	۳۰	۷۲,۳
۸	۱,۵	٦	۳۰	٦۹,۲
۹	۱,۵	٦	۳۰	٦۷,۵
۱۰	۱,۵	٦	۳۰	٦٦,۷
۱۱	۲,۵	۱۰	۵۰	٦۷,۱
۱۲	۱,۵	۱۰	۳۰	٦۷,۲
۱۳	۲,۵	۱۰	۱۰	۷۰
۱٤	۱,۵	٦	۱۰	۷۳,۵
۱۵	۱,۵	٦	۳۰	٦۸
۱٦	۱,۵	۲	۳۰	۷۰,۳
۱۷	۲,۵	۲	۵۰	٦۸,٤
۱۸	۰,۵	۱۰	۵۰	٦۷,۹
۱۹	۱,۵	٦	۳۰	٦٦,٤
۲۰	۲,۵	۲	۱۰	٦۹,۷



شکل ٤ دستگاه سختی سنج مورد استفاده



شکل ۵ چهارچوب پیشنهادی

پیش‌بینی و بهینه‌سازی

در این تحقیق، ایجاد یک سیستم استنتاج فازی جهت پیش‌بینی و بهینه‌سازی میزان سختی بر اساس سه پارامتر سرعت، کشش و توان مد نظر است. ایجاد و استفاده از این سیستم در سه فاز انجام می‌شود: فاز یک: خوشه‌بندی، فاز دو: استخراج قواعد اگر– آن‌گاه و فاز سه: پیش‌بینی و بهینه‌سازی سختی در سیستم استنتاج ساخته‌شده در نرم‌افزار متلب. جزئیات چهارچوب پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است.

الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی

الگوریتمهای خوشه‌بندی سلسله مراتبی در دو دسته: ۱) بالا به پایین یا ۲) پایین به بالا، قرار می‌گیرند. الگوریتمهای پایین به بالا که در این تحقیق از آن استفاده شده است، هر نقطه داده را در ابتدا به عنوان یک خوشه واحد در نظر می‌گیرند و سپس به طور پی‌درپی جفت خوشه‌ها را ادغام می‌کنند (یا جمع می‌شوند) تا زمانی که همه خوشه‌ها در یک خوشه واحد ادغام می‌شوند که شامل تمام نقاط داده است. ازاین‌رو خوشه‌بندی سلسله مراتبی از پایین به بالا را خوشه‌بندی جمع‌بندی سلسله مراتبی گفته می‌شود. این خوشه‌های سلسله مراتبی به عنوان یک درخت نشان داده می‌شود. ریشه درخت یک خوشه منحصر به فرد است که همه نمونه‌ها را جمع می‌کند، برگهای خوشه فقط یک نمونه هستند. مراحل الگوریتم به صورت زیر است:

فاز یک: با پردازش هر نقطه داده به عنوان یک خوشه واحد شروع می‌شود، یعنی اگر N داده در مجموعه داده وجود داشته باشد، N خوشه هم وجود دارد. سپس یک معیار فاصله انتخاب می‌شود. به عنوان مثال، فاصله بین دو خوشه را میانگین فاصله بین نقاط داده در خوشه اول و نقاط داده در خوشه دوم تعریف می‌شود.

فاز دو: در هر تکرار، دو خوشه با هم ترکیب می‌شود. دو خوشه‌ای که باید ترکیب شوند با توجه به معیار دورترین فاصله با پیوند کامل با هم ترکیب شوند.

فاز سه: فاز دوم تکرار می‌شود تا زمانی که به ریشه درخت می‌رسد، یعنی فقط یک خوشه وجود دارد که شامل تمام نقاط داده است. به این ترتیب می‌توان انتخاب کرد که در پایان چه تعداد خوشه مد نظر است، به سادگی با انتخاب زمان متوقف کردن ترکیب خوشه‌ها خوشه‌بندی سلسله مراتبی نیازی به تعیین تعداد خوشه ندارد و حتی می‌توان بعد از ساختن درخت تعیین کرد که تعداد خوشه‌ها چقدر باشد مناسبتر است. علاوه بر این، الگوریتم به انتخاب اندازه فاصله حساس نیست. در حالی که در

الگوریتمهای دیگر خوشه‌بندی، انتخاب اندازه فاصله بسیار مهم است. یک مورد استفاده از روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی این است که داده‌ها دارای ساختار سلسله مراتبی هستند و هدف بازیابی سلسله مراتب است. پس از اجرای روش خوشه‌بندی سلسه مراتبی در نرم‌افزار مینی‌تب نتایج در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳ نتایج خوشه‌بندی جمع‌بندی سلسله مراتبی

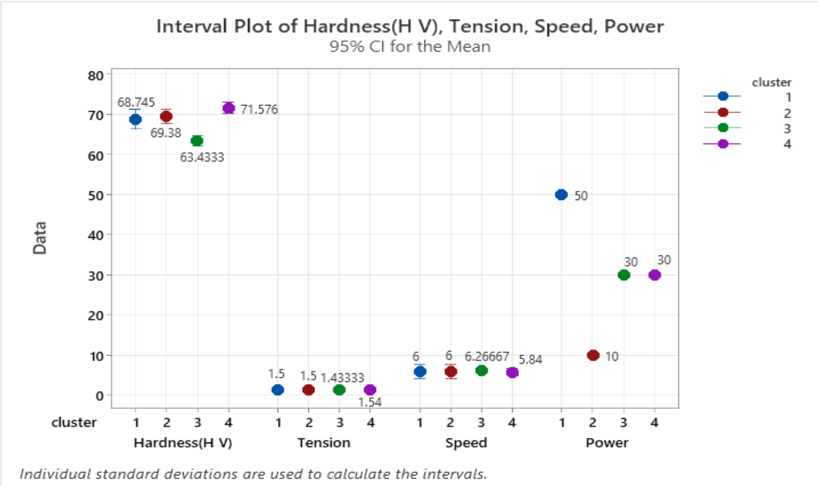
گام	تعداد خوشه‌ها	سطح شباهت	سطح فاصله	گام	تعداد خوشه‌ها	سطح شباهت	سطح فاصله
1	79	100.000	0.0000	15	65	98.889	0.5000
2	78	100.000	0.0000	16	64	98.222	0.8000
3	77	100.000	0.0000	17	63	98.222	0.8000
4	76	100.000	0.0000	18	62	97.778	1.0000
5	75	99.778	0.1000	19	61	97.778	1.0000
6	74	99.778	0.1000	20	60	97.767	1.0050
7	73	99.778	0.1000	21	59	97.734	1.0198
8	72	99.778	0.1000	22	58	97.734	1.0198
9	71	99.778	0.1000	23	57	97.556	1.1000
10	70	99.556	0.2000	24	56	97.516	1.1180
11	69	99.333	0.3000	25	55	97.154	1.2806
12	68	99.111	0.4000	26	54	97.111	1.3000
13	67	98.889	0.5000	27	53	97.111	1.3000
14	66	98.889	0.5000	28	52	96.889	1.4000
29	51	96.857	1.4142	55	25	90.172	4.4227
30	50	96.667	1.5000	56	24	89.961	4.5177
31	49	96.529	1.5620	57	23	89.817	4.5826
32	48	96.529	1.5620	58	22	89.756	4.6098
33	47	96.222	1.7000	59	21	89.150	4.8826
34	46	95.556	2.0000	60	20	88.669	5.0990
35	45	95.468	2.0396	61	19	88.537	5.1585
36	44	95.213	2.1541	62	18	88.264	5.2811
37	43	95.031	2.2361	63	17	87.429	5.6569
38	42	95.031	2.2361	64	16	82.222	8.0000
39	41	94.928	2.2825	65	15	81.947	8.1240
40	40	94.699	2.3854	66	14	81.620	8.2710
41	39	94.444	2.5000	67	13	81.307	8.4119
42	38	94.021	2.6907	68	12	81.014	8.5440
43	37	94.017	2.6926	69	11	80.981	8.5586
44	36	93.870	2.7586	70	10	80.413	8.8142
45	35	92.973	3.1623	71	9	79.006	9.4472
46	34	92.667	3.3000	72	8	74.859	11.3137
47	33	92.533	3.3601	73	7	74.000	11.7000
48	32	92.222	3.5000	74	6	73.572	11.8929
49	31	92.222	3.5000	75	5	66.501	15.0748
50	30	92.172	3.5228	76	4	59.051	18.4272
51	29	91.802	3.6892	77	3	54.889	20.3000
52	28	91.778	3.7000	78	2	37.460	28.1432
53	27	91.778	3.7000	79	1	0.000	45.0004
54	26	90.457	4.2942				

جدول ٤ توزیع مشاهدات در خوشه‌بندی با تعداد خوشه ثابت چهار

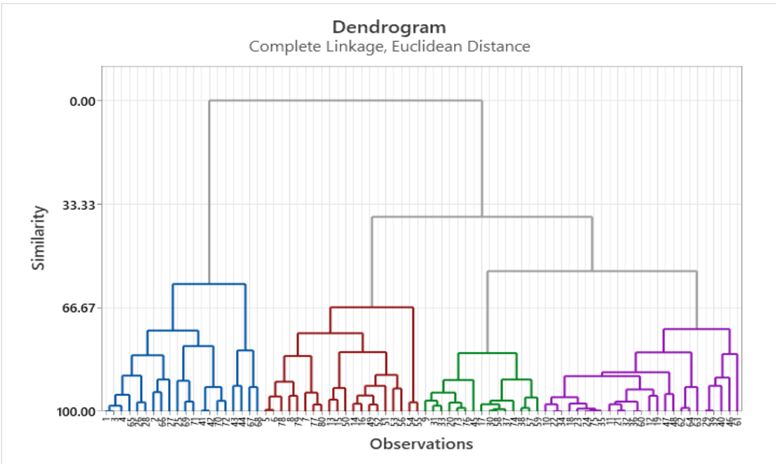
خوشه‌ها	تعداد مشاهدات	مجموع مربعات درون خوشه	میانگین فاصله از مرکز	حداکثر فاصله از مرکز
خوشه ۱	20	798.650	5.76043	11.2293
خوشه ۲	20	543.272	4.91257	9.1200
خوشه ۳	15	91.060	2.01756	4.7413
خوشه ٤	25	399.266	3.45312	7.7433

جدول ۵ ماتریس فواصل در خوشه‌بندی با تعداد خوشه ثابت چهار

	خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳	خوشه ٤
خوشه ۱	0.0000	40.0050	20.6952	20.2000
خوشه ۲	40.0050	0.0000	20.8672	20.1209
خوشه ۳	20.6952	20.8672	0.0000	8.1545
خوشه ٤	20.2000	20.1209	8.1545	0.0000



شکل ٦ نمودار فاصله‌ای خوشه‌ها



شکل ۷ نمودار درختی خوشه‌ها

همان طور که در ستون سطح شباهت مشاهده می‌شود از تعداد خوشه دو به بعد، میزان شباهت از ۱۰ درصد که در خوشه‌بندی آستانه در نظر گرفته می‌شود بیشتر است. بنابراین تعداد مورد قبول خوشه‌ها از دو بیشتر می‌تواند باشد. بعد از انجام مجدد خوشه‌بندی مشخص می‌شود که اگر تعداد خوشه‌ها ٤ در نظر گرفته شود توزیع داده‌ها به صورت یکنواختتر در خوشه‌ها انجام می‌شود. نتایج خوشه‌بندی با تعداد خوشه ثابت چهار در جداول (٤) و (۵) نشان داده شده است.

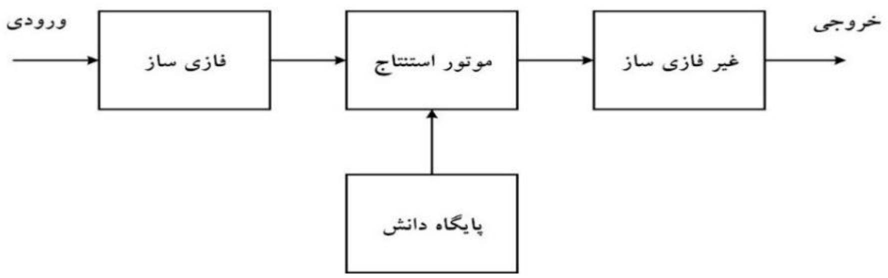
شایان ذکر است که الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی دو بار انجام می‌شود: یکبار بدون تعیین تعداد خوشه‌ها و دفعه دوم با توجه به سطح شباهت به دست آمده از اجرای اول الگوریتم با تعیین تعداد خوشه‌ها. نمودار فاصله‌ای و درختی مربوط به خوشه‌ها به ترتیب در شکل (٦) و شکل (۷) آمده‌اند.

سیستمهای استنتاج فازی

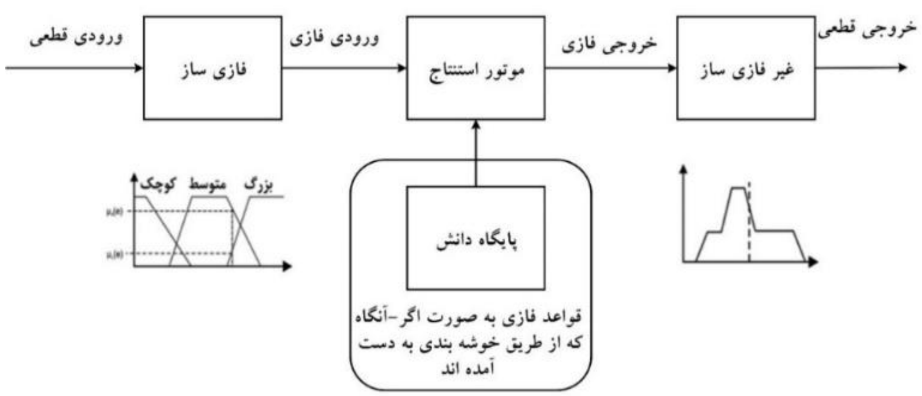
در شکل (۸) یک سیستم استنتاج فازی نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده است هر سیستم استنتاج فازی به طور کلی متشکل از چار بخش: ۱) فازی‌ساز، ۲) موتور استنتاج فازی ۳) پایگاه دانش ٤) غیرفازی‌ساز، می‌باشد. عملیات تبدیل متغیرهای قطعی به متغیرهای زبانی را فازی‌سازی می‌گویند. موتور استنتاج با استفاده از الگوریتم‌های استنتاج، قوانین را ارزیابی و استنتاج می‌کند و پس از تجمیع قوانین خروجی توسط واحد غیرفازی‌ساز، به مقدار قطعی تبدیل می‌شود. در واقع استنتاج فازی فرایند نگاشت مجموعه ورودی داده شده به یک مجموعه خروجی با استفاده از منطق فازی است. به عبارتی، از سیستم استنتاجگر فازی به عنوان یک روش دانش پایه، در جهت پیش‌بینی خروجی‌ها می‌توان استفاده کرد.

الگوریتم استنتاج ممدانی

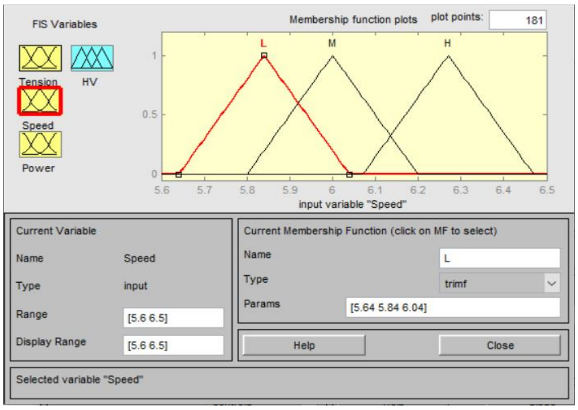
سیستم استنتاج ممدانی را ممدانی و اسیلیان در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد دادند. این سیستم‌ها به دلیل داشتن طبیعت بصری و تفسیری از قوانین می‌توانند به طور گسترده‌ای در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم استفاده شوند، همچنین دارای قدرت بیانی بالایی هستند و می‌توانند به هر دو صورت چندورودی و چندخروجی و چندورودی و یک خروجی پیاده‌سازی شوند [27]. دیاگرام کلی سیستم استنتاج فازی ممدانی در شکل (۹) نشان داده شده است، سیستم استنتاج ممدانی از مجموعه‌های فازی به عنوان نتیجه قانون استفاده می‌کند و خروجی هر قانون به صورت غیرخطی و فازی است. همچنین از لحاظ روش غیرفازی‌سازی با بقیه سیستم‌های استنتاج متفاوت است. جعبه ابزار ساخت این سیستم استنتاج در نرم‌افزار متلب وجود دارد که در این مقاله از آن استفاده شده است. در شکل (۱۰)، سه ورودی (کشش، سرعت و توان) و خروجی (سختی) در نرم‌افزار تعریف شده‌اند.



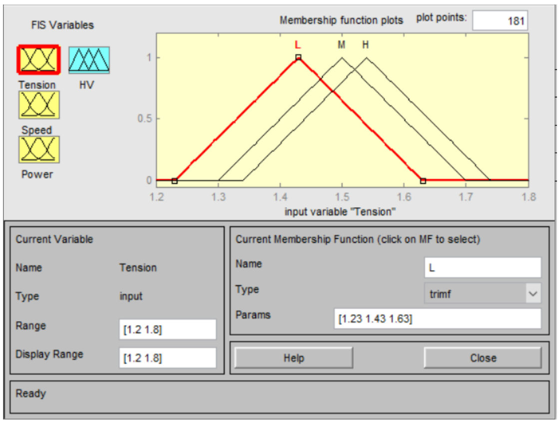
شکل ۸ سیستم استنتاج فازی



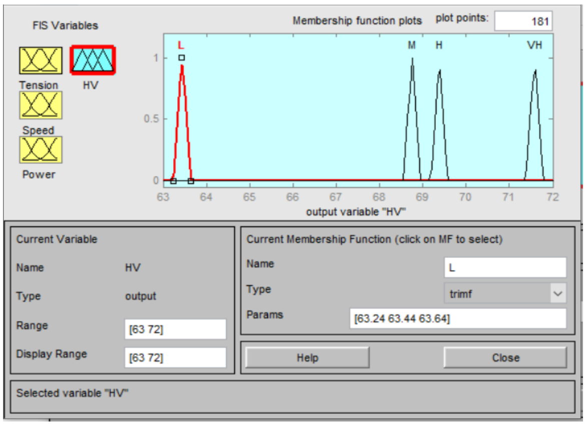
شکل ۹ سیستم استنتاج فازی ممدانی



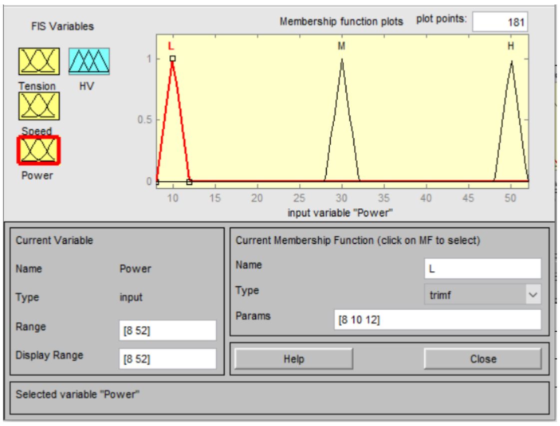
سرعت(ورودی)



کشش(ورودی)

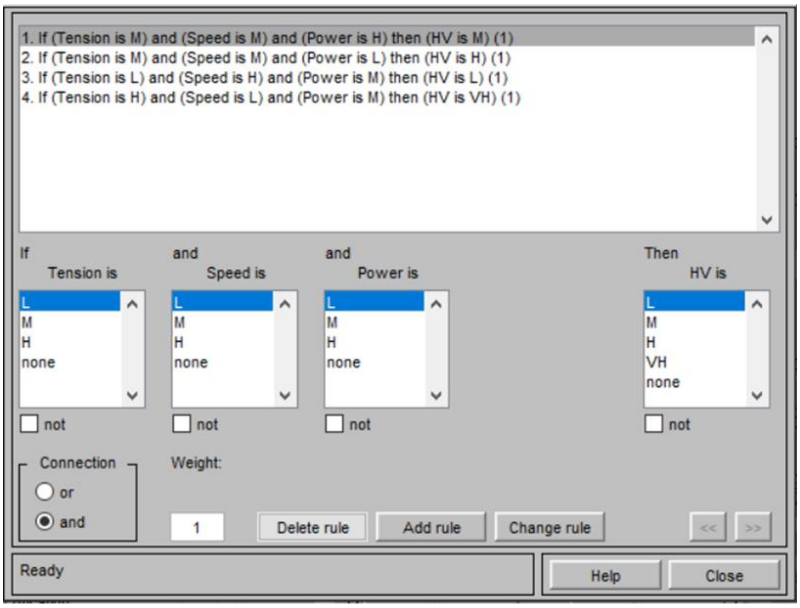


سختی(خروجی)

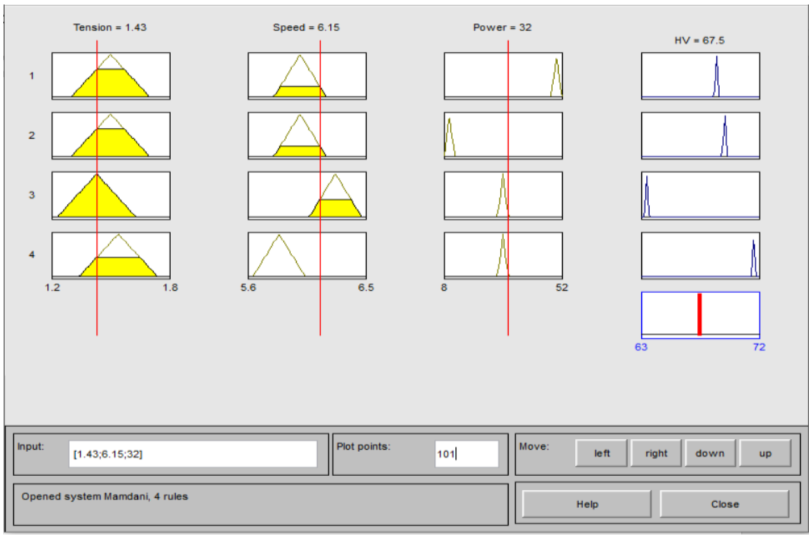


توان(ورودی)

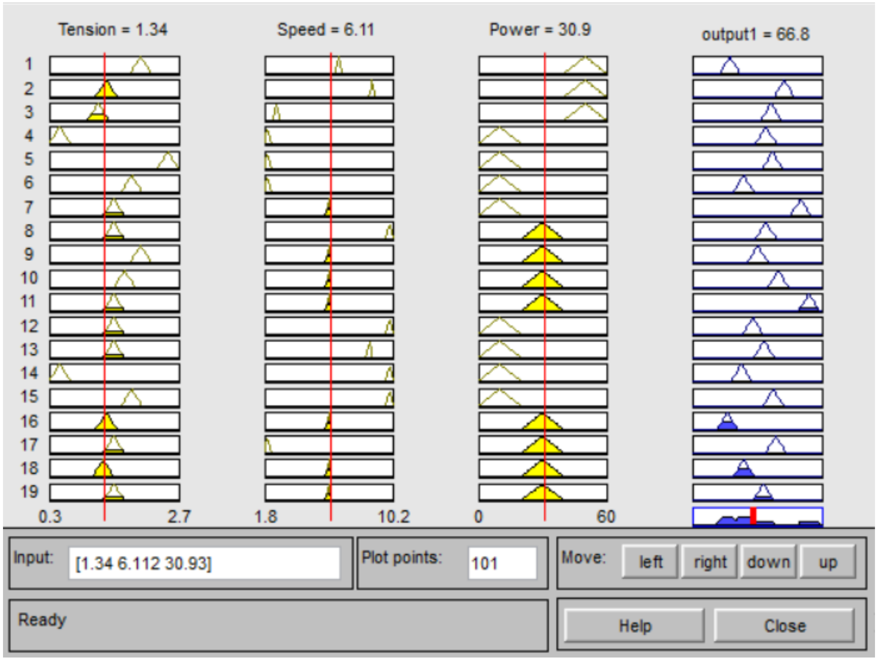
شکل ۱۰ تعریف ورودی‌ها و خروجی در سیستم استنتاج ممدانی



شکل ۱۱ پایگاه قواعد تعریف شده بر اساس نتایج خوشه‌بندی (چهار خوشه)



شکل ۱۲ پیش‌بینی مقدار سختی (چهار قاعده)



شکل ۱۳ پیش‌بینی مقدار سختی (نوزده قاعده)

همان‌طور که در شکل (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود، قواعد به صورت زیر است:

۱) اگر کشش «متوسط» و سرعت «متوسط» و توان «زیاد» باشد آنگاه سختی «متوسط» است.

۲) اگر کشش «متوسط» و سرعت «متوسط» و توان «کم» باشد آنگاه سختی «زیاد» است.

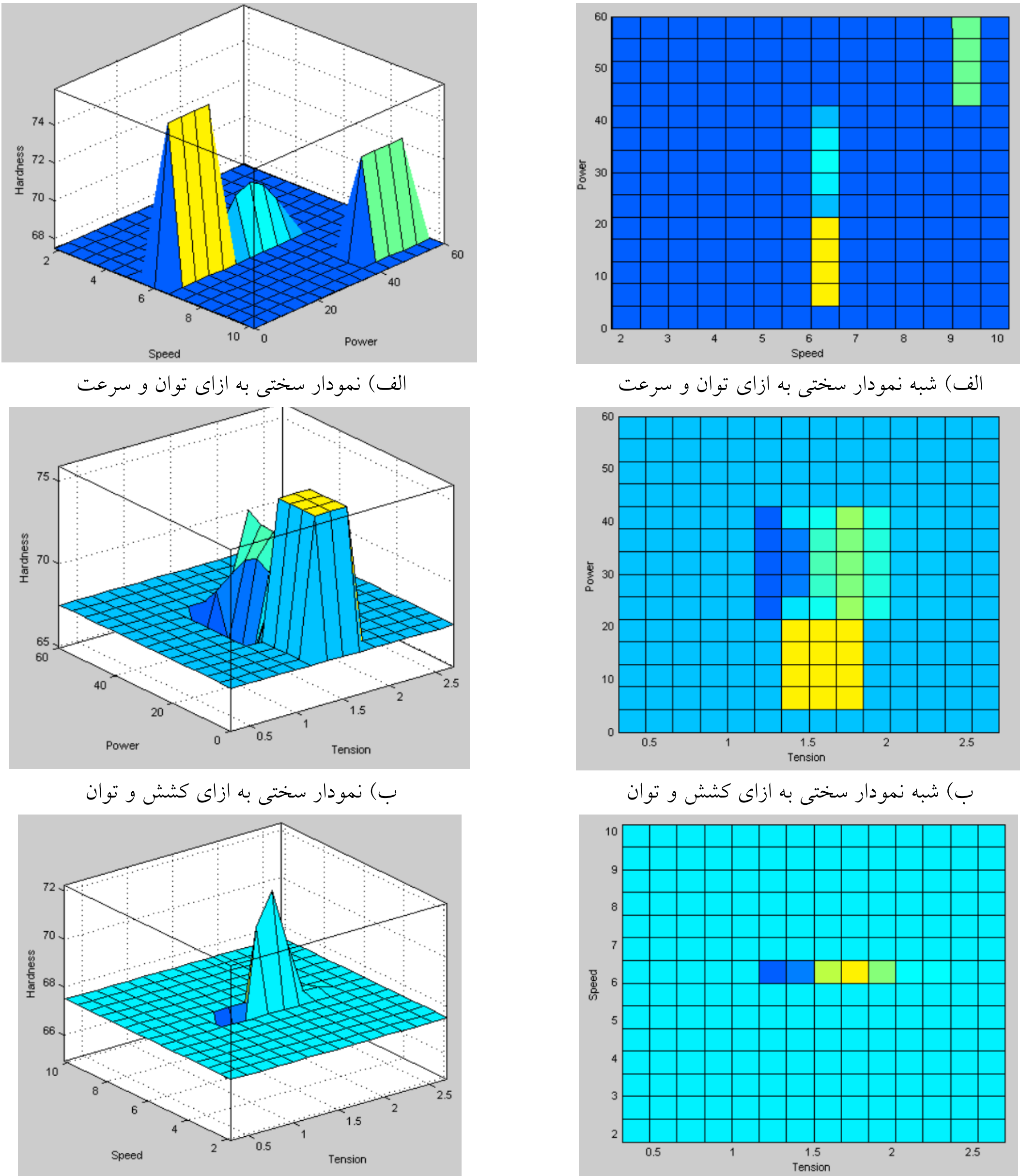
۳) اگر کشش «کم» و سرعت «زیاد» و توان «متوسط» باشد آنگاه سختی «کم» است.

٤) اگر کشش «زیاد» و سرعت «کم» و توان «متوسط» باشد آنگاه سختی «خیلی زیاد» است.

به عنوان مثال به ازای کشش برابر ١/٤٣، سرعت برابر ٦/١٥ و توان برابر ٣٢ ، آنگاه سختی برابر ٦٧/٥ خواهد شد. در این سیستم ایجاد شده، می‌توان به ازای مقادیر مختلف ورودی، مقدار سختی را پیش‌بینی کرد. هر چه تعداد قواعد بیشتر باشد، میزان پیش‌بینی‌ها دقیقتر خواهد شد و البته میزان محاسبات نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین برای افزایش دقت پیش‌بینی، در شکل (۱۳) یک پایگاه قاعده نوزده‌تایی طراحی شده است. بر این اساس و به عنوان نمونه، به ازای کششِ ١/٣٤، سرعتِ

۶/۱۱ و توان ۳۰,۹۳، آنگاه سختی برابر ۶۶,۸ خواهد شد. در ادامه و جهت پیداکردن مقادیر بهینه متغیرهای ورودی، نمودار و شبه‌نمودار متغیر سختی به ازای متغیرهای ورودی رسم شد.

در شکل (۱۴– الف) با توجه به پایگاه قواعد نوزده‌تایی، مقدار سختی به ازای مقادیر مختلف کشش و توان به صورت رویه رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه سختی به ازای ۱,۶۷ ≤ کشش≤ ۱,۳۳ و ۱۵ ≤ توان≤ ۱، اتّفاق افتاده است (یک ناحیه). در شکل (۱۴–ب)، مقدار سختی به ازای مقادیر مختلف کشش و سرعت به صورت رویه رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه سختی به ازای ۱,۶۷۶= کشش و ۶= سرعت، اتفّاق افتاده است (یک نقطه). در شکل (۱۴–ج)، مقدار سختی به ازای مقادیر مختلف توان و سرعت به صورت رویه رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه سختی به ازای ۲۰≤ توان ≤۵ و ۶= سرعت، اتفّاق افتاده است (یک خط). مقادیر بهینه سه متغیر کشش، توان و سرعت در فصل مشترک جواب‌های مشخص شده اتفّاق می‌افتد. به عبارت دیگر اگر ۱,۶۷= کشش، ۱۵≤ توان ≤۵ و ۶= سرعت باشند مقدار سختی (۷۵,۹) بیشینه می‌شود.



الف) شبه نمودار سختی به ازای توان و سرعت

الف) نمودار سختی به ازای توان و سرعت

ب) شبه نمودار سختی به ازای کشش و توان

ب) نمودار سختی به ازای کشش و توان

ج) شبه نمودار سختی به ازای کشش و سرعت

چ) نمودار سختی به ازای کشش و سرعت

شکل ۱۴ شبه نمودار سختی بر حسب متغیرهای ورودی

تست اعتبارسنجی

بر اساس نمودارهای پیش‌بینی، جهت اعتبارسنجی مدل، برای مقادیر کشش ١,٦٧، توان ١٠ و سرعت ٦، تست تجربی انجام گردید و مقدار سختی برابر ٧٤,٦ به دست آمد که هم دارای تطابق بسیار خوبی (٢ درصد خطا) با نتیجه مدل (٧٥,٩) است و هم بیشترین مقدار سختی در میان تست‌های تجربی است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی و بهینه-سازی مقدار سختی بر حسب متغیرهای کشش سیم، سرعت تغذیه سیم و توان ژنراتور در فرایند وایرکات فولاد Mo40 مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج به خوبی نشان می‌دهد که این سیستم قابلیت پیاده-سازی جهت پیش‌بینی و بهینه‌سازی سختی در فرایند وایرکات را دارا می‌باشد. جهت افزایش دقت مدل، تعداد قواعد از چهار به نوزده افزایش یافت. بر اساس نمودارهای استخراج شده مقدار بیشینه سختی برای مقادیر کشش ١,٦٧، توان ١٠ و سرعت ٦، به دست آمد. این مقادیر به صورت تجربی تست گردید و مقدار سختی برابر ٧٤,٦ به دست آمد که هم دارای تطابق بسیار خوبی با نتیجه مدل (٧٥,٩) است (حدود ٢ درصد خطا) و هم بیشترین مقدار سختی در میان تست‌های تجربی را نشان می‌دهد.

واژه نامه

وایرکات(ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی‌سیمی)	Wirecut
سیستم‌استنتاج‌فازی	Fuzzy Inference System
مایع‌دی‌الکتریک	Dielectric fluid
سرعت‌تزریق‌سیم	Wire injection speed
کشش‌سیم	Wire tension
توان ژنراتور	Generator power
قطعه‌کار	Workpiece
سختی	Hardness

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] Singh, S. and Bhardwaj, A., “Review to EDM by using water and powder-mixed dielectric fluid,” *Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 199, 2011.

[2] Majumder, H. and Maity, K., “Prediction and optimization of surface roughness and micro-hardness using grnn and MOORA-fuzzy-a MCDM approach for nitinol in WEDM,” *Measurement*, vol. 118, pp. 1-13, 2018.

[3] Singh, J., Singh, R. and Kumar, R., “Review on effects of process parameters in wire cut EDM and wire electrode development,” *International Journal of Innovative Research in Science*, vol. 2, pp. 701-706, 2016.

[4] Ho, K.H., Newman, S.T., Rahimifard, S. and Allen, R.D., “State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM),” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 12-13, 2004.

[5] Snoeys, R. and Van Dijck, F., “Plasma channel diameter growth affects stock removal in EDM,” vol. 21, no.1, pp. 39-40, 1972.

[6] Pandit, S.M. and Rajurkar, K.P., “A stochastic approach to thermal modeling applied to electro-discharge machining,” *Heat Transfer*, vol. 105, pp. 555-562, 1983.

[7] Pandey, P.C. and Jilani, S.T., “Plasma channel growth and the resolidified layer in EDM,” *Precision Engineering*, vol. 8, pp. 104-110, 1986.

[8] Shankar, P., Jain, V.K. and Sundararajan, T., “Analysis of spark profiles during EDM process,” *Machining Science and Technology*, vol. 1, pp. 195-217, 1997.

[9] Guu, Y.H. and Hocheng, H., “Improvement of fatigue life of electrical discharge machined AISI D2 tool steel by

TiN coating," *Materials Science and Engineering*, vol. 318, pp. 155-162, 2001.

[10] Jeelani, S. and Collins, M.R., "Effect of electric discharge machining on the fatigue life of Inconel 718," *International Journal of Fatigue*, vol. 10, pp. 121-125, 1988.

[11] Zeid, O.A., "On the effect of electrodischarge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel,"*Journal of Materials Processing Technology*, vol. 68, pp. 27-32, 1997.

[12] Ramulu, M., Paul, G. and Patel, J., "EDM surface effects on the fatigue strength of a 15 vol% SiCp/Al metal matrix composite material," *Composite Structures*, vol. 54, pp. 79-86, 2001.

[13] Khan, N., Wahid, M., Singh, S., Siddiquee, A. and Khan, Z., "A study on micro hardness in wire electrical discharge machining based on taguchi method," *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, vol. 1, pp.10-15, 2013.

[14] Lotfi Neyestanak, A., Daneshmand, S. and Adib Nazari, S., "The effect of operational cutting parameters in the wire electro discharge machining (WEDM) on micro hardness of alloy surface layer," *International Journal of Advanced design and Manufacturing Technology*, vol. 2, no. 4, pp.51-58, 2010. (In Persian)

[15] Mahmoudinia, I., Soleimanimehr, H., maghsoudpour, A. and Etemadi Haghighi, S.H., "Fractal-based analysis of the influence of current intensity on surface hardness and surface roughness of Steel workpiece in Electrical Discharge process," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 11, pp. 21-33, 2021. (In Persian)

[16] Kiyak, M., "Investigation of effects of cutting parameters on surface quality and hardness in the wire-EDM process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, pp. 647-655, 2022.

[17] Kavitha, C., Malini, P.G., Kantumuchu, V.C., Kumar, N.M., Verma, A. and Boopathi, S., "An experimental study on the hardness and wear rate of carbonitride coated stainless steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 1, 2022.

[18] Paturi, U.M.R., Cheruku, S., Pasunuri, V.P.K., Salike, S., Reddy, N.S. and Cheruku, S., "Machine learning and statistical approach in modeling and optimization of surface roughness in wire electrical discharge machining," *Machine Learning with Applications*, vol. 6, 2021.

[19] Rao, M., Vijayan, V., Anil, A., Rai, P.K. and Jain, N. R., "Effect of wire electrode discharge machining process parameters on the surface roughness, hardness, and microstructure of the high carbon steels," *Materials Today: Proceedings*, vol.46, pp. 2625-2629, 2021.

[20] Das, P.P. and Chakraborty, S., "A grey correlation-based TOPSIS approach for optimization of surface roughness and micro hardness of Nitinol during WEDM operation," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 568-573, 2020.

[21] Manjunatha, B.B., Ravindra, H.V. and Kuruvila, N., "Estimation of surface roughness and dimentional accuracy using process parameters in wire cut EDM by attificial neural network," *International of Symposium on Measurement and Quality Control*, vol. 1, 2007.

[22] Boadh, R., Yadav, S.N., Tiwari, A., Rajoria, Y.K. and Singh, J. "Application of fuzzy inference system (FIS) for assessment and predication of compressive asset of concrete containing fly ash," *Materials Today: Proceedings*, vol. 69, pp. 107-111, 2022.

[23] Vechione, M. and Cheu, R.L., "Comparative evaluation of adaptive fuzzy inference system and adaptive neuro-

fuzzy inference system for mandatory lane changing decisions on freeways," *Intelligent Transportation Systems*, vol. ۲٦, pp. 746-760, 2021.

[24] Wu, Y., Guo, H., Song, H. and Deng, R., "Fuzzy inference system application for oil-water flow patterns identification," *Energy*, vol. 239, pp. 122359, 2022.

[25] Bo, L., Han, L., Xiang, C., Liu, H. and Ma, T., "A Q-learning fuzzy inference system based online energy management strategy for off-road hybrid electric vehicles," *Energy*, vol. 252, pp. 123976, 2022.

[26] Valizadeh, M., Braki, Z.A., Rashidi, R., Maghfourian, M. and Shenas, A.T., "Fuzzy inference system and adaptive neuro-fuzzy inference system approaches based on spectrophotometry method for the simultaneous determination of salmeterol and fluticasone in binary mixture of pharmaceutical formulation," *Optik*, vol. 244, pp. 167599, 2021.

[27] Mamdani, E.H. and Assilian, S., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, pp. 1-13, 1975.